

การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตาที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินบิทูมินัส

อรรคเดช อับดุลมาติน^{1*} ปกป้อง รัตนชู¹

มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ต.โคกเคียน อ.เมือง จ.นราธิวาส 96000

เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล² วีรชาติ ตั้งจิรภัทร³ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล⁴

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* Corresponding Author: akkadath.a@pnu.ac.th

¹ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁴ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 29 สิงหาคม 2562

แก้ไข : 16 มกราคม 2563

ตอบรับ : 11 กุมภาพันธ์ 2563

คำสำคัญ :

กำลังอัด / เถ้ากันเตา / ปฏิกิริยา

ปอซโซลาน / วัสดุปอซโซลาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตา บดละเอียด 2 ชนิด ได้แก่ เถ้ากันเตาจากถ่านหินลิกไนต์ (GLBA) และเถ้ากันเตาจากถ่านหินบิทูมินัส (GBBA) เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ในมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า ในช่วงอายุปลายของมอร์ตาร์ การใช้เถ้ากันเตา GLBA และ GBBA ที่มีปริมาณอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3.70 และ 3.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงที่สุด กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม) ของมอร์ตาร์ GLBA ที่มีอัตราการแทนที่ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9-11 ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 13-17 ที่อายุ 90 วัน ขณะที่มอร์ตาร์ GBBA มีกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานอยู่ระหว่างร้อยละ 15-25 และร้อยละ 17-38 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตา GLBA มีค่าน้อยกว่าเถ้ากันเตา GBBA ที่อัตราการแทนที่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม เถ้ากันเตา GLBA ยังคงสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยมีค่ากำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 80 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วันขึ้นไป

A Study of Pozzolanic Reaction of Two Bottom Ashes Obtained from Lignite and Bituminous Coal Combustion

Akkadath Abdulmatin^{1*}, Pokpong Rattanachu¹,

Princess of Naradhiwas University, Khokkien, Muang, Narathiwat 96000

Penpichcha Khongpermgon², Weerachart Tangchirapat³ and Chai Jaturapitakul⁴

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

* Corresponding Author: akkadath.a@pnu.ac.th

¹ Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Ph.D. candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

⁴ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: August 29, 2019

Revised: January 16, 2020

Accepted: February 11, 2020

Keywords:

Compressive Strength /

Bottom Ash /

Pozzolanic Reaction /

Pozzolanic Material

This study aimed to evaluate the compressive strength due to pozzolanic reaction of two types of ground bottom ash. Ground lignite (GLBA) and bituminous (GBBA) bottom ashes were used as pozzolanic materials to replace ordinary Portland cement (OPC) in mortar at either 10, 20, 30 or 40% by weight of binder. The results showed that at the later age, the use of GLBA and GBBA, which possessed the particles retained on No. 325 sieve of 3.70 and 3.05%, respectively, at 10% and 20% by weight of binder, respectively, resulted in the highest compressive strength of mortar. Compressive strength due to pozzolanic reaction of GLBA mortars with the replacement ratios of 10-40% by weight of binder ranged between 9-11% at 28 days and increased to 13-17% at 90 days of the control mortar. On the other hand, GBBA mortars exhibited compressive strength due to pozzolanic reaction between 15-25% and 17-38% at 28 days and 90 days, respectively. These results indicated that the compressive strength due to pozzolanic reaction of GLBA mortars was lower than that of GBBA mortars at the same replacement rate. However, GLBA could still be used to replace OPC by up to 30% by weight of binder; the resulting mortar exhibited the compressive strength higher than 80% of that of the control mortar at 28 days.

1. บทนำ

ปัจจุบันการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ายังคงมีอย่างต่อเนื่องทั่วโลก และเป็นที่ทราบกันดีว่าหลังจากกระบวนการเผาถ่านหินมีผลพลอยได้หลักๆ อยู่ 2 ส่วน ได้แก่ เถ้าถ่านหิน (fly ash) ประมาณร้อยละ 60-80 และเถ้าก้นเตา (bottom ash) ประมาณร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนัก สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตมีอย่างต่อเนื่องทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศและมีมาตรฐานรองรับในการใช้งานเป็นวัสดุปอซโซลาน ทำให้ในปัจจุบันเถ้าถ่านหินที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตในประเทศไทยมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการในตลาด ในทางตรงกันข้ามเถ้าก้นเตายังคงนำไปทิ้งโดยไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ การทิ้งเถ้าก้นเตาไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มต้นทุนในการกำจัด แต่ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะการศึกษาของ Gong และคณะ [1] พบว่ามีการพบโลหะหนัก เช่น Cd, Cr, และ Pb ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินบริเวณกองทิ้งของเถ้าก้นเตาและสารเหล่านี้จะถูกชะไหลลงสู่แม่น้ำ ในขณะที่ Di Bella และคณะ [2] รายงานว่าเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีองค์ประกอบของโลหะหนักเช่น Ni, Cu, Zn, Pb, และ Cd แต่ปริมาณความเข้มข้นขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน [3] ด้วยเหตุนี้หากสามารถใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ นอกจากเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์แล้วยังส่งผลให้โลหะหนักในเถ้าก้นเตาที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมนั้นถูกตรึงไว้ในคอนกรีตได้เช่นเดียวกัน [4]

เถ้าก้นเตาที่ได้รับจากโรงงานโดยตรงมีลักษณะเหมือนทราย มีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหิน มีนักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาเพื่อนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีต [5-7] อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาบดละเอียดพบว่าเถ้าก้นเตามีศักยภาพเพียงพอที่สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์หรือใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประสานได้ [8-9] นอกจากนี้ Jaturapitakkul และ Cheerarot [10] พบว่าเถ้าก้นเตาที่ได้รับจากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ แต่เมื่อนำมาบดให้ละเอียดจนมีอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์มาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลัง

อัดคอนกรีตและมีกำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุมเมื่อคอนกรีตมีอายุ 60 วันขึ้นไป ต่อมา Abdulmatin และคณะ [11] ได้แนะนำว่าหากต้องการนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานควรบดให้มีอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าดัชนีกำลังไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 วันขึ้นไปและเมื่อบดเถ้าก้นเตาจนมีอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักสามารถให้ค่าดัชนีกำลังได้สูงกว่าร้อยละ 100 เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 60 วันขึ้นไป Oruji และคณะ [12] ได้เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาและเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินซับบิทูมินัส (sub-bituminous) พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาในส่วนผสมมีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าถ่านหินในส่วนผสมในอัตราส่วนการแทนที่เดียวกันอยู่ประมาณร้อยละ 7 อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาในส่วนผสมไม่เกินร้อยละ 23 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมได้เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 60 วันขึ้นไป

สำหรับสมบัติทางเคมีของเถ้าก้นเตาและเถ้าถ่านหินมักเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของถ่านหินโดยส่วนใหญ่พบว่าถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินซับบิทูมินัสเมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหินประเภท C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [13] กล่าวคือมีปริมาณผลรวมออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริก (Fe_2O_3) อยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูงมากกว่าร้อยละ 10 ขึ้นไป สำหรับถ่านหินบิทูมินัสหรือแอนตราไซต์หลังจากผ่านการเผาพบว่าเป็นเถ้าถ่านหินประเภท F ซึ่งมีปริมาณผลรวม SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และมักมี CaO ต่ำกว่าร้อยละ 10 สำหรับผลกระทบของ CaO ต่อสมบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์มีการศึกษาโดย Antiohos และคณะ [14] ซึ่งรายงานว่าเถ้าถ่านหินที่มี CaO ต่ำจะให้กำลังอัดช่วงอายุต้นต่ำกว่าเถ้าถ่านหินที่มี CaO สูง เนื่องจากปริมาณปูนขาวอิสระ (free lime) ในเถ้าถ่านหินที่มี CaO สูงสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) โดยไม่อาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการพัฒนา กำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินที่มี CaO ต่ำมีค่ามากขึ้นจนมากกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินที่มี CaO สูงที่อายุ 90 วันขึ้นไป ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าในช่วง

อายุปลาย กำลังอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินที่มี CaO ต่ำเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน [15]

จากข้อมูลมาข้างต้นเห็นได้ว่าที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าถ่านหินที่มีความแตกต่างด้านองค์ประกอบทางเคมีหรือเถ้าถ่านหินที่มีจากการเผาถ่านหินต่างชนิดกันในงานคอนกรีต อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาด้านผลกระทบของการใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินต่างชนิดกันต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตซึ่งอาจให้ผลที่แตกต่างออกไปจากกรณีของเถ้าถ่านหิน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษากำลังอัดและกำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ของเถ้าถ่านหิน 2 แหล่ง ซึ่งมีองค์ประกอบเคมีแตกต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อหาปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และจากถ่านหินบิทูมินัสที่เหมาะสม ที่ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด

2.2 เพื่อหาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินบิทูมินัสต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

2.3 เพื่อเปรียบเทียบกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และจากถ่านหินบิทูมินัส

3. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาและวิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)
- เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (LBA) และเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัส (BBA) ซึ่งอยู่ในสภาพเปียก นำมาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำเถ้าถ่านหินทั้ง 2 ชนิด มาบดให้มีความละเอียดค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 ± 1 โดยน้ำหนัก

- ทราเยมน้ำสำหรับใช้เป็นมวลรวมละเอียดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 และค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 นอกจากนี้ ยังนำทราเยมน้ำมาบดให้มีความละเอียดค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 ± 1 โดยน้ำหนัก เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยา (nonreactive material; GS)

แทนที่ปูนซีเมนต์สำหรับทำร้อยละกำลังอัดเพื่อหาปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน

- น้ำประปา สำหรับใช้ผสมและบ่มมอร์ตาร์
- สารลดน้ำพิเศษประเภท polycarboxylate-based

เพื่อใช้ควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้อยู่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115

3.2 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทดสอบสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าถ่านหินจากการเผาถ่านหินลิกไนต์บดละเอียด (GLBA) เถ้าถ่านหินจากการเผาถ่านหินบิทูมินัสบดละเอียด (GBBA) และทราเยมน้ำบดละเอียด (GS) ได้แก่ ค่าร้อยละน้ำหนักค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size; d_{50}) และความถ่วงจำเพาะ นอกจากนี้ได้ทดสอบสมบัติเชิงแรงยืดและความเป็นผลึกของวัสดุด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เชิงปริมาณ (XRD Quantitative) สำหรับสมบัติทางเคมีได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

3.3 ส่วนผสมและการทดสอบมอร์ตาร์

ส่วนผสมของมอร์ตาร์ทั้ง 13 ส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1 โดยทุกส่วนผสมใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1: 2.75 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B ratio) คงที่เท่ากับ 0.65 มีการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้อยู่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer; SP) เพื่อช่วยปรับค่าการไหลแผ่ตามต้องการ มอร์ตาร์ควบคุม (CT) ใช้วัสดุประสานจาก OPC ทั้งหมด มอร์ตาร์ที่ใช้ศึกษาแบ่งเป็น 3 ชุด คือ มอร์ตาร์ GLBA, GBBA และ GS ในแต่ละชุดแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุ GLBA, GBBA และ GS ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

การศึกษาคြ်นี้ใช้มอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร หลังจากการหล่อมอร์ตาร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำมอร์ตาร์ออกจากแบบและบ่มมอร์ตาร์ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวจนถึงอายุการทดสอบ ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [16] ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน โดยค่ากำลังอัดในแต่ละอายุการทดสอบได้จากการเฉลี่ยจากมอร์ตาร์ 5 ตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

มอร์ตาร์	ส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุ ประสาน	การไหลแผ่ (ร้อยละ)
	OPC	GLBA	GBBA	GS	Sand	SP		
CT	100	-	-	-	275	-	0.65	109
GLBA10	90	10	-	-	275	-	0.65	106
GLBA20	80	20	-	-	275	0.05	0.65	108
GLBA30	70	30	-	-	275	0.12	0.65	111
GLBA40	60	40	-	-	275	0.20	0.65	108
GBBA10	90	-	10	-	275	-	0.65	109
GBBA20	80	-	20	-	275	-	0.65	114
GBBA30	70	-	30	-	275	0.05	0.65	113
GBBA40	60	-	40	-	275	0.10	0.65	109
GS10	90	-	-	10	275	-	0.65	113
GS20	80	-	-	20	275	-	0.65	110
GS30	70	-	-	30	275	0.05	0.65	111
GS40	60	-	-	40	275	0.10	0.65	107

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

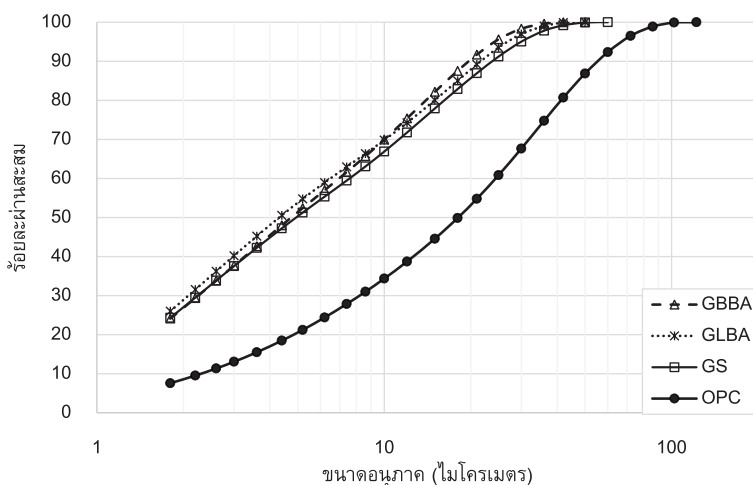
4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ศึกษาครั้งนี้ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC), เถ้าก้นเตาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์บดละเอียด (GLBA), เถ้าก้นเตาจากการเผาถ่านหินบิทูมินัสบดละเอียด (GBBA), และทรายแม่น้ำบดละเอียด (GS) ความละเอียดของ OPC, GLBA, GBBA, และ GS แสดงในรูปของค่าร้อยละน้ำหนักข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าเท่ากับร้อยละ 16.80, 3.70, 4.09 และ 3.76 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 3.14, 2.68, 2.55 และ 2.61 ตามลำดับ รูปที่ 1 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุทั้ง 4 ชนิด ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า GLBA, GBBA และ GS มีการกระจายตัวของอนุภาคใกล้เคียงกัน โดย

มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4.32, 4.76 และ 4.95 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ OPC มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 18.08 ไมโครเมตร องค์ประกอบทางแร่วิทยา (Mineralogical composition) ของ GLBA, GBBA และ GS แสดงดังตารางที่ 3 ผลการทดสอบพบว่า GS มีความเป็นผลึกร้อยละ 100 โดยอยู่ในรูปของ Quartz, Microcline และ Muscovite ร้อยละ 80.4, 17.7 และ 1.9 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกับงานวิจัยของ Norrarat และคณะ [17] ที่ระบุว่าทรายแม่น้ำ (River sand) มีค่าความเป็นผลึกร้อยละ 100 ซึ่งอยู่ในรูปของ Quartz, Microcline, Albite และ Muscovite ร้อยละ 79.4, 13.6, 3.9 และ 3.1 ตามลำดับ ผลการทดสอบนี้สามารถบอกได้ว่า GS เป็นวัสดุเฉื่อย (Inert material) ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยา สำหรับ GLBA ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ สำหรับผลการ

ทดสอบของงานวิจัยก่อนหน้านี้โดย Hanjitsuwan, S. and Phoo-ngernkham [8] รายงาน แก่กันเตาจากการโรงไฟฟ้า แม่เมาะมีองค์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกของแร่ Quartz, Anorthite, Calcite, Augite, และ Gypsum ในขณะที่ผลการทดสอบครั้งนี้พบว่ามีความไม่เป็นผลึก (Amorphous) ร้อยละ 58.5 แร่ผลึกส่วนใหญ่ของ GLBA อยู่ในรูปของ Anorthite, Muscovite, และ Diopside (รูปหนึ่งของ Augite) ร้อยละ 15.9, 3.5 และ 9.1 ตามลำดับ และอยู่ในรูปของแร่ผลึก Quartz, Magnetite, Calcite, Gypsum, แร่ผลึกอื่นๆ รวมกันเท่ากับ ร้อยละ 13.0 (แสดงดังตารางที่ 3) ซึ่งแตกต่างจากลักษณะ แร่ผลึกของ GBBA ที่ได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัสที่อยู่ในรูปของ Quartz, Mullite, Corundum, Cristobalite, และ Rutile เท่ากับร้อยละ 14.2, 20.0, 1.1, 1.8 และ 0.4 ตามลำดับ และ

ความไม่เป็นผลึกของ GBBA มีค่าสูงกว่า GLBA โดย GBBA มีค่าความไม่เป็นผลึกเท่ากับร้อยละ 62.5 ในขณะที่ GLBA มีค่าความไม่เป็นผลึกเท่ากับร้อยละ 58.5 แม้แก่กันเตาได้มาจากการเผาถ่านหินเช่นเดียวกับแก่ถ่านหิน แต่พบว่าเมื่อนำค่าความไม่เป็นผลึกของแก่กันเตาทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับ แก่ถ่านหิน แก่กันเตาทั้งสองชนิดมีค่าความไม่เป็นผลึกต่ำกว่า แก่ถ่านหิน โดยที่ความไม่เป็นผลึกของแก่ถ่านหินมีค่าประมาณ ร้อยละ 70-95 [18] จากรายงานของ Chindaprasirt และคณะ [18] ระบุว่าถ้าแก่ถ่านหินขนาดเล็กมีค่าความไม่เป็นผลึกสูงกว่า แก่ถ่านหินขนาดใหญ่ โดยแก่ถ่านหินขนาดเล็กมีค่าความไม่เป็นผลึกเท่ากับร้อยละ 85-95 ในขณะที่แก่ถ่านหินขนาดใหญ่มีค่าความไม่เป็นผลึกเท่ากับร้อยละ 70-75



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุ OPC, GLBA, GBBA และ GS

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ประมาณค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d_{50} (ไมโครเมตร)	ความถ่วงจำเพาะ
OPC	16.80	18.08	3.14
GLBA	3.70	4.32	2.68
GBBA	3.09	4.76	2.55
GS	3.76	4.95	2.61

ตารางที่ 3 องค์ประกอบในทางแร่วิทยาของวัสดุ GLBA, GBBA และ GS

วัสดุ	GLBA		GBBA		GS	
แร่หลัก (ร้อยละ)	Quartz	1.8	Quartz	14.2	Quartz	80.4
	Hematite	1.0	Mullite	20.0	Microcline	17.7
	Magnetite	1.8	Corundum	1.1	Muscovite	1.9
	Albite	1.9	Cristobalite	1.8		
	Anorthite	15.9	Rutile	0.4		
	Calcite	1.9				
	Gypsum	1.3				
	Muscovite	3.5				
	Diopside	9.1				
	Gehlenite	2.0				
	Ettringite	1.3				
ความไม่เป็นผลึก (ร้อยละ)	58.5		62.5		0.0	

4.2 สมบัติทางเคมีของวัสดุ

ตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ องค์ประกอบหลักทางเคมีของ OPC คือ CaO และ SiO₂ มีค่าเท่ากับร้อยละ 63 และ 20.9 ตามลำดับ สำหรับ GLBA และ GBBA มีค่าผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 71.2 และ 91.2 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าปริมาณของ SO₃ และ LOI มีค่าไม่เกินร้อยละ 5 และ 6 ตามลำดับ จากองค์ประกอบทางเคมีบ่งบอกได้ว่า GLBA และ GBBA จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [13] แม้ว่า GLBA และ GBBA เป็นถ้ำกันเตาบดละเอียด อย่างไรก็ตามปริมาณ CaO ของ GLBA มีค่าสูงถึงร้อยละ 17 ในขณะที่ GBBA มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.2 เมื่ออิงตามการศึกษา

ของ McCarthy และคณะ [19] พบว่า GLBA ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้จัดเป็นวัสดุที่มี CaO ระดับกลาง โดยมีค่า CaO ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 20 ในขณะที่ GBBA จัดเป็นวัสดุที่มี CaO ต่ำกว่าคือ มีค่า CaO ต่ำกว่าร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของ GLBA ที่มาจากแหล่งเดียวกันแต่ช่วงเวลาแตกต่างกันพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของ GLBA แตกต่างกันเล็กน้อย Wongsang-ngu และคณะ [20] รายงานว่าถ้ำกันเตาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ มี SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เท่ากับร้อยละ 46.0, 22.3, 10.6 และ 11.5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าถ้ำกันเตาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ในปัจจุบันที่ใช้ในการศึกษาจะมีปริมาณ SiO₂ ต่ำลงและมีปริมาณ CaO ที่สูงขึ้น องค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปดังกล่าวอาจส่งผลให้สมบัติ

ของของกรีทหรือมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาจากการเผาถ่านหิน
ลิกไนต์ ในส่วนผสมเปลี่ยนไป

สำหรับ GS ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีองค์ประกอบหลักคือ

SiO₂ มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.5 ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางแร่
วิทยาของ GS ที่มีแร่ Quartz สูงถึงร้อยละ 80.4

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	OPC	GLBA	GBBA	GS
SiO ₂	20.9	38.1	61.7	91.5
Al ₂ O ₃	4.8	20.4	24.0	3.7
Fe ₂ O ₃	3.4	12.7	5.5	1.8
CaO	63.3	17.0	2.2	0.2
MgO	1.3	2.8	1.1	< 0.01
SO ₃	2.7	1.7	0.2	0.0
Na ₂ O	0.3	1.4	0.5	< 0.01
K ₂ O	0.4	2.2	1.3	2.6
LOI	2.9	3.6	2.9	0.2

4.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

กำลังอัดของมอร์ตาร์ทั้ง 13 ส่วนผสมแสดงดังตาราง
ที่ 5 เห็นได้ว่ามอร์ตาร์ CT มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 25.8, 28.4,
38.8 และ 43.5 เมกะพาสคัล ที่อายุ 3, 7, 28 และ 90 วัน
ตามลำดับ โดยในช่วงอายุต้น (3 และ 7 วัน) มอร์ตาร์ GLBA,
GBBA และ GS ทุกส่วนผสมมีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT
และพบว่าในช่วงอายุต้นกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่
มากขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่อายุ 3 วัน การแทนที่ร้อยละ 10 โดย
น้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้มอร์ตาร์ GLBA10, GBBA10
และ GS10 มีกำลังอัดเท่ากับ 23.8, 24.3 และ 23.5 เมกะ-
พาสคัล ตามลำดับ เมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 40 โดย
น้ำหนักของวัสดุประสาน กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงเหลือ
16.7, 17.1 และ 15.5 เมกะพาสคัล สำหรับมอร์ตาร์ GLBA40,
GBBA40 และ GS40 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการลด
ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลงเป็นการลดปริมาณ C3S และ C2S
ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงอายุต้นลดลง อย่างไรก็ตามเมื่ออายุ
มากขึ้นมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาในส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัด

ได้สูงขึ้นโดยมอร์ตาร์ GLBA10 มีกำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์
CT ที่อายุ 60 วัน และมีกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ CT ที่อายุ
90 วัน เมื่อเพิ่มการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA เป็น
ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำลังอัดมอร์ตาร์
GLBA20 มีค่าเท่ากับร้อยละ 84 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ
3 วัน และที่อายุ 90 วัน สามารถพัฒนากำลังอัดได้เทียบเท่า
มอร์ตาร์ CT อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ GLBA30 และ GLBA40
มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT ทุกอายุการทดสอบ ผลการทดสอบ
นี้สอดคล้องกับรายงานของ Kurama และคณะ [21] ได้ศึกษา
คอนกรีตที่มีเถ้าก้นเตาจากถ่านหินลิกไนต์ในส่วนผสม พบว่า
การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาจากถ่านหินลิกไนต์ร้อยละ 10
และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้กำลังอัดสูงกว่า
คอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 6 และ 2 ที่อายุ 56 วัน
ตามลำดับ แต่สำหรับการแทนที่ที่ร้อยละ 25 พบว่ากำลัง
คอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแม้คอนกรีตมีอายุที่ 56 วัน
การพัฒนา กำลังอัดเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อพิจารณา มอร์ตาร์
ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA (เถ้าก้นเตาจากถ่านหินบิทูมินัส)

ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ GBBA10 แม้ว่ามีส่วนปูนซีเมนต์ในส่วนผสมหายไปร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แต่มอร์ตาร์ GBBA มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ CT ตั้งแต่อายุ 14 วัน ประมาณร้อยละ 2 และมีกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ CT ร้อยละ 5, 6 และ 8 เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อทำการแทน GBBA ในส่วนผสมเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าเท่ากับ 39.9, 43.9 และ 49.2 เมกะพาสคัล ซึ่งมากกว่ามอร์ตาร์ CT เป็นร้อยละ 3, 7 และ 13 ที่อายุ 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ สำหรับการ ใช้ GBBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ถึงแม้ว่ามอร์ตาร์ GBBA40 มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT ประมาณร้อยละ 35 ที่อายุ 3 วัน แต่เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 90 วัน พบว่ามอร์ตาร์ GBBA40 มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงมอร์ตาร์ CT ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นถึงผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาขั้นที่สองที่ต้องรอสารตั้งต้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดค่อนข้างต่ำในช่วงอายุต้น แต่กำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงอายุปลายทำให้บางส่วนผสมมีกำลัง

อัดสูงกว่ามอร์ตาร์ CT [22-24]

สำหรับมอร์ตาร์ GS ในทุกการแทนที่พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อมอร์ตาร์มีอายุเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับมอร์ตาร์ CT, GLBA และ GBBA อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงร้อยละของกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT พบว่ามอร์ตาร์ GS ทุกการแทนที่มีร้อยละของกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT ค่อนข้างคงที่ แม้มอร์ตาร์มีอายุเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ GS10 มีกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT เท่ากับร้อยละ 91, 88, 90, 91, 90 และ 92 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาแต่ละการแทนที่สามารถหาค่าเฉลี่ยร้อยละของกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT ได้เท่ากับร้อยละ 90, 82, 72 และ 62 สำหรับมอร์ตาร์ GS10, GS20, GS30 และ GS40 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาศึกษาโดย Jaturapitakul และคณะ [25] ที่พบว่ามอร์ตาร์ที่มีทรายบดละเอียดขนาดอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5.8 ในส่วนผสมที่อัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับร้อยละ 92, 84, 76 และ 64 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 กำลังอัดของมอร์ตาร์

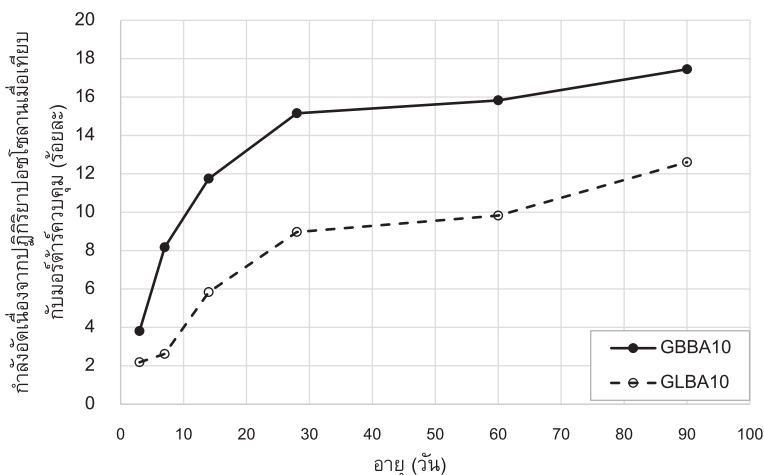
มอร์ตาร์	กำลังอัด (เมกะพาสคัล)- ร้อยละของกำลังอัด						ค่าเฉลี่ยร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ GS
	3 days	7 days	14 days	28 days	60 days	90 days	
CT	25.8- 100	28.4- 100	33.7- 100	38.8- 100	41.1- 100	43.5- 100	
GLBA10	23.8- 92	26.3- 93	32.4- 96	38.5- 99	41.2- 100	44.7- 103	
GLBA20	21.6- 84	24.8- 87	29.6- 88	35.7- 92	39.7- 96	43.3- 100	
GLBA30	19.0- 74	21.5- 76	26.3- 78	31.9- 82	34.7- 84	38.3- 88	
GLBA40	16.7- 65	18.1- 64	23.2- 69	28.4- 73	31.0- 75	34.5- 79	
GBBA10	24.3- 94	27.9- 98	34.4- 102	40.9- 105	43.6- 106	46.8- 108	
GBBA20	22.2- 86	26.7- 94	33.4- 99	39.9- 103	43.9- 107	49.2- 113	
GBBA30	20.1- 78	22.9- 81	30.3- 90	38.1- 98	42.7- 104	47.4- 109	
GBBA40	17.1- 66	19.1- 67	27.4- 81	33.9- 87	38.6- 94	43.6- 100	
GS10	23.5- 91	24.9- 88	30.4- 90	35.3- 91	36.9- 90	39.9- 92	90
GS20	21.2- 82	24.1- 85	27.6- 82	31.2- 80	33.3- 81	35.5- 82	82
GS30	18.8- 73	20.7- 73	24.7- 73	27.4- 71	29.1- 71	30.4- 70	72
GS40	15.5- 60	18.1- 64	21.2- 63	24.4- 63	25.5- 62	26.3- 61	62

4.4 ร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยา ปอซโซลาน

ตารางที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ GS เทียบกับมอร์ตาร์ CT แสดงให้เห็นถึงค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีการแทนที่ OPC ด้วย GS ในปริมาณการแทนที่แตกต่างกัน โดย Jaturapitakkul และคณะ [25] รายงานว่ากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าเท่ากับร้อยละ 88.8, 80.7, 73.1 และ 58.1 เมื่อมี OPC ในส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 90, 80, 70 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และมีกำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาค (Packing effect) ที่มีขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 5 ± 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 2.7, 3.4, 2.8 และ 5.8 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ สำหรับในการศึกษาครั้งนี้กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าเท่ากับร้อยละ 90, 82, 72 และ 62 ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำค่าร้อยละของกำลังของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนการแทนที่ต่างกลบลด้วยค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะได้ค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (รวมการอัดตัวของอนุภาค) ของเถ้าก้นเตาเมื่อเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ของมอร์ตาร์ทั้งสองประเภทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออายุเพิ่มขึ้นและปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตา GBBA แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วง 4-6 ที่อายุ 3 วัน และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15-25 และ 17-38 ที่อายุ

28 และ 90 วัน ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตา GLBA ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วง 2-3, 9-11 และ 13-17 ที่อายุ 3, 28, และ 90 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่ามอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่ามอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA ในทุกอัตราส่วน และทุกช่วงอายุการทดสอบ ในช่วงอายุต้นมอร์ตาร์ GBBA มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA เล็กน้อย เป็นที่สังเกตว่าเถ้าก้นเตา GLBA มีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 17.0 แต่มอร์ตาร์ GLBA ยังคงมีกำลังอัดช่วงต้นต่ำเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA ซึ่งมีปริมาณ CaO เพียงร้อยละ 2.2 ลักษณะดังกล่าวนี้แตกต่างไปจากพฤติกรรมของเถ้าถ่านหิน โดย Papadakis [26] รายงานว่า เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณ CaO สูง (CaO เท่ากับร้อยละ 22.7) ในมอร์ตาร์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงต้นที่ได้จากการแทนที่ของเถ้าถ่านหินมีการพัฒนาสูงขึ้นประมาณร้อยละ 31 ของกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยกำลังที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงอายุต้นไม่ได้เกิดจากความละเอียดของเถ้าถ่านหินเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดเนื่องจากการประสานด้วยตัวเอง (Self-cementing) ของเถ้าถ่านหินที่มี CaO อีกด้วย อย่างไรก็ตามสำหรับผลการทดสอบของมอร์ตาร์เถ้าก้นเตาที่ศึกษาในครั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ถึงแม้เถ้าก้นเตา GLBA มี CaO สูงกว่าเถ้าก้นเตา GBBA แต่ปริมาณความไม่เป็นผลึกของเถ้าก้นเตา GLBA มีค่าต่ำกว่าเถ้าก้นเตา GBBA โดยเถ้าก้นเตา GBBA มีค่าเท่ากับร้อยละ 62.5 ในขณะที่ GLBA มีค่าเท่ากับร้อยละ 58.5 นอกจากนี้เถ้าก้นเตาที่ได้จากโรงไฟฟ้าอยู่ในสภาวะเปียกชื้น ด้วยเหตุนี้อาจทำให้ CaO อิสระที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาได้ทำปฏิกิริยาไปแล้วบางส่วน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่ใช้ GBBA และ GLBA แทนที่ OPC ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม และอายุการบ่ม

จากรูปที่ 2 พบว่าความแตกต่างของค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมระหว่างมอร์ตาร์ GLBA และ GBBA เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้น (หลังจาก 14 วันขึ้นไป) มอร์ตาร์ GBBA มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA อยู่ประมาณร้อยละ 6, 11, 17 และ 17 สำหรับอัตราส่วนการแทนที่เถ้ากันเตาร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (รูปที่ 2, 3, 4 และ 5) ตามลำดับจากผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่ออายุมากขึ้นปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ของเถ้ากันเตาส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างชัดเจน โดยเถ้ากันเตา GLBA มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 58.5 มีร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้ากันเตา GBBA ซึ่งมีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 85.7 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 มีผลโดยตรงต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออายุปลายของมอร์ตาร์ [22, 27]

รูปที่ 3 เปรียบเทียบร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตาทั้งสองชนิดเทียบกับเถ้าถ่านหินลิกไนต์บดละเอียดจากงานวิจัยก่อนหน้า [28] ซึ่งมีอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 4.3 มีปริมาณ

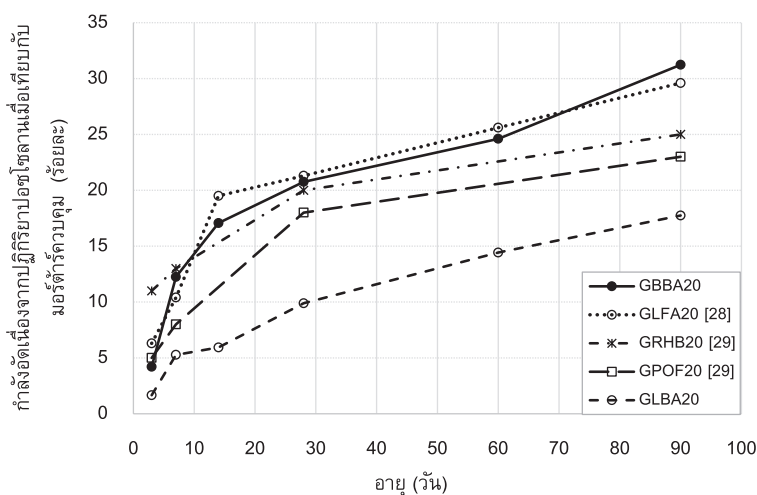
SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO เท่ากับร้อยละ 45.78, 21.13 และ 12.03 ตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B Ratio) ในส่วนผสมมอร์ตาร์เท่ากับ 0.65 ซึ่งมีค่าเท่ากับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อมีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GLFA20) พบว่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ของมอร์ตาร์ GLFA20 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ GBBA20 แต่เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ GLBA20 ซึ่งมาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์เหมือนกันพบว่ามอร์ตาร์ GLFA20 มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA20 อาจเนื่องมาจากเถ้ากันเตามีความเป็นผลึกสูงกว่าเถ้าถ่านหินที่มีจากแหล่งเดียวกัน ประกอบกับเถ้าถ่านหินจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ ที่ใช้มาอ้างอิงในครั้งนี้มีลักษณะทางกายภาพกลมทำให้วัสดุมีการกระจายตัวได้ดีในส่วนผสมส่งผลให้ส่วนผสมมอร์ตาร์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

นอกจากนี้หากเปรียบเทียบร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตาบดละเอียดจากถ่านหินทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับวัสดุปอซโซลานจากเถ้าชีวมวลในได้แก่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (GRHB) และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOF) [29] ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า ร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GRHB20) มีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์

GBBA20 และมอร์ตาร์ GLBA20 อย่างไรก็ตามช่วงอายุปลาย (หลังจาก 28 วัน) มอร์ตาร์ GRHB20 มีค่าร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำกว่ามอร์ตาร์ GBBA20 เล็กน้อย แต่ยังคงสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA20 ในขณะที่ ร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเจ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GPOF20) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ GBBA20 ในช่วงอายุต้น และมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ GBBA20 เมื่อมีอายุ

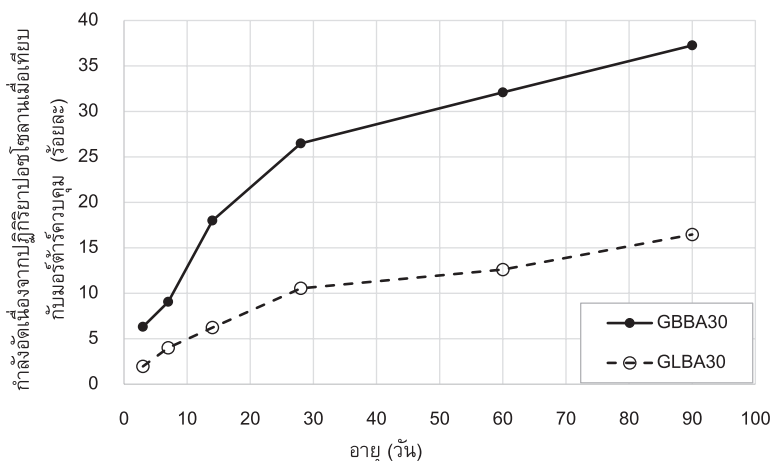
28 วันขึ้นไป อย่างไรก็ตามร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ GPOF20 ยังคงมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA20 ทุกช่วงอายุ

จากผลการทดสอบครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าเจ้ากันเกรา GBBA มีสมบัติปอซโซลานมากกว่า GLBA โดยร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของ GBBA มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นจากการศึกษาของงานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น เจ้าถ่านหิน, เจ้าเกลบ-เปลือกไม้ และเจ้าปาล์มน้ำมัน

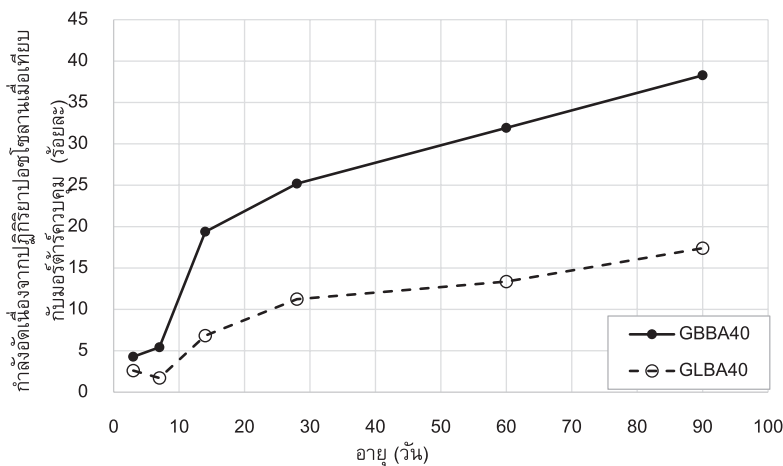


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่ใช้ GLFA, GBBA และ GLBA แทนที่ OPC ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม และอายุการบ่ม

หมายเหตุ สำหรับมอร์ตาร์ GRHB20 และ GPOF20 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่ใช้ GBBA และ GLBA แทนที่ OPC ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม และอายุการบ่ม

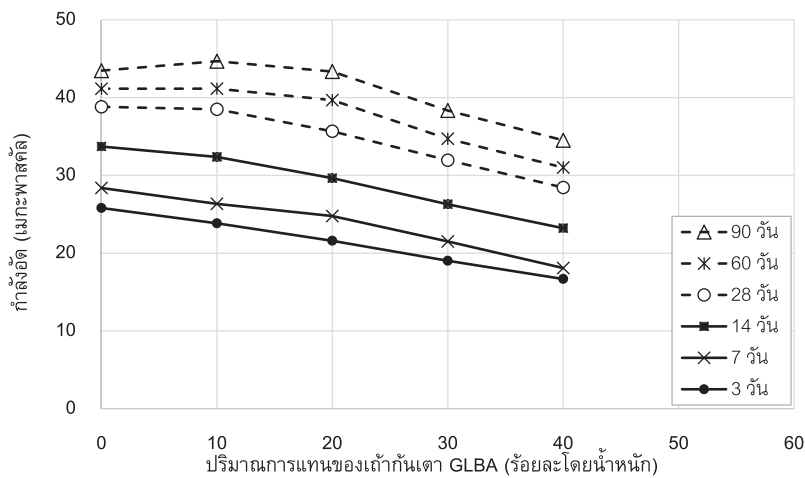


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่ใช้ GBBA และ GLBA แทนที่ OPC ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม และอายุการบ่ม

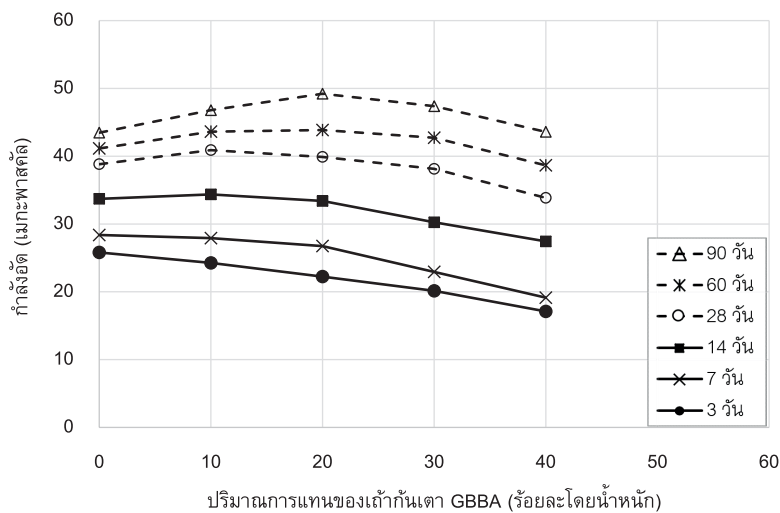
4.5 ปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตา GLBA กับกำลังอัดของมอร์ตาร์ ตามรูปที่ 6 สำหรับอายุการบ่ม 3 วัน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง เป็นผลเนื่องมาจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม อย่างไรก็ตามเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 60 วันและ 90 วัน พบว่าอัตราการลดลงของกำลังอัดเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าลดลงโดยสามารถสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อายุ 90 วัน พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตา GLBA ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงสุด และมีกำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมเมื่อใช้เถ้าก้นเตา GLBA ในส่วนผสมไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หากพิจารณาร้อยละของกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT การเพิ่มอัตราการแทนที่ของเถ้าก้นเตา GLBA ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้การกระทบในด้านกำลังอัดไม่มากนักเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ CT กล่าวคือมอร์ตาร์ GLBA30 ยังคงมีกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 3 วัน ขึ้นไป และเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 วัน

สำหรับอิทธิพลการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์แสดงดังรูปที่ 7 ในช่วงอายุต้นของมอร์ตาร์ GBBA ผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับมอร์ตาร์ GLBA กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ที่มีปริมาณเถ้าก้นเตาในส่วนผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงสุด ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตา GBBA แสดงผลได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นที่อายุ 60 วัน หากสังเกตจากเส้นกราฟ จะเห็นได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA ไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มอร์ตาร์มีการพัฒนา กำลังได้สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุ 90 วัน โดยสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมถึงร้อยละ 10 ผลการทดสอบนี้มีทิศทางเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Jaturapitakkul และ Cheerarot [10] ซึ่งรายงานว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาแต่ละชนิดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในช่วงร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถพัฒนา กำลังอัดได้สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ตั้งแต่อายุ 60 วันขึ้นไป โดยมีมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตา ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้กำลังอัดสูงสุดโดยมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเท่ากับร้อยละ 8 และ 12 ที่อายุ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตา GLBA



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตา GBBA

5. สรุปผลการวิจัย

จากงานผลของการวิจัยเถ้าก้นเตา GLBA และ GBBA เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับองค์ประกอบทางเคมีหากใช้มาตรฐาน ASTM C618 เป็นเกณฑ์ พบว่าทั้งเถ้าก้นเตา GLBA และ GBBA ที่มีปริมาณอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3.70 และ 3.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F โดยมีค่าผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 71.2

และ 91.2 ตามลำดับ แม้ว่าเถ้าก้นเตาจะไม่ใช่เถ้าถ่านหิน

2. ผลึกส่วนมากที่พบในเถ้าก้นเตา GLBA อยู่ในรูปของ Anorthite และ Diopside โดยมีปริมาณร้อยละ 15.9 และ 9.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีปริมาณอสัณฐานเท่ากับร้อยละ 58.5 โดยน้ำหนัก สำหรับผลึกที่พบในเถ้าก้นเตา GBBA อยู่ในรูปของ Mullite และ Quartz มีค่าเท่ากับร้อยละ 20 และ 14 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีปริมาณอสัณฐานเท่ากับร้อยละ 62.5 โดยน้ำหนัก

3. การใช้เถ้าก้นเตา GLBA และ GBBA ที่มีปริมาณอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3.70 และ 3.05 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสม พบว่ามอร์ตาร์ GBBA มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA ในอัตราส่วนการแทนที่ที่เท่ากัน

4. การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดจนมีปริมาณอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3 ± 1 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุปอซโซลานสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยมีกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุมากกว่า 14 และ 60 วัน สำหรับมอร์ตาร์ GBBA40 และ GLBA40 ตามลำดับ

5. เมื่อกำหนดให้มอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันพบว่า อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA ที่ให้กำลังอัดสูงที่สุดคือร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสำหรับเถ้าก้นเตา GBBA

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 6222) และสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สาขานครินทร์ อีกทั้งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่เอื้อเฟื้อวัสดุที่ใช้สำหรับการทำวิจัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Gong, X., Wu, T., Qiao, Y. and Xu, M., 2009, "In Situ Leaching of Trace Elements in a Coal Ash Dump and Time Dependence Laboratory Evaluation," *Energy & Fuels*, 24 (1), pp. 84-90.
2. Di Bella, M., Italiano, F., Magazù, S., Mottese, A., Interdonato, M., Gentile, F. and Sabatino, G., 2018, "Risk Assessment of Bottom Ash from Fuel Oil Power Plant of Italy: Mineralogical, Chemical and Leaching Characterization," *Environmental Earth Sciences*, 77 (5), pp. 1-9.

3. Anastasiadou, K., Christopoulos, K., Mousios, E. and Gidarakos, E., 2012, "Solidification/Stabilization of Fly and Bottom Ash from Medical Waste Incineration Facility," *Journal of Hazardous Materials*, 207, pp. 165-170.
4. Hashemi, S.S.G., Mahmud, H.B., Ghuan, T.C., Chin, A.B., Kuenzel, C. and Ranjbar, N., 2019, "Safe Disposal of Coal Bottom Ash by Solidification and Stabilization Techniques," *Construction and Building Materials*, 197, pp. 705-715.
5. Krudam, W., Akkarapanyatorn, W. and Sahamitmongkol, R., 2016, "Effect of Bottom Ash on Autogenous Shrinkage of Binary Binder Mortar," *Journal of Thailand Concrete Association*, 4 (2), pp. 1-13. (In Thai)
6. Wongsas, A., Zaetang, Y., Sata, V. and Chindaprasit, P., 2016, "Properties of Lightweight Fly Ash Geopolymer Concrete Containing Bottom Ash as Aggregates," *Construction and Building Materials*, 111, pp. 637-643.
7. Goudar, S.K., Shivaprasad, K. and Das, B.B., 2019, "Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Using Coal-Bottom Ash as Replacement of Fine Aggregate," *Sustainable Construction and Building Materials*, 25, pp. 863-872.
8. Hanjitsuwan, S. and Phoo-ngernkham, T., 2017, "Utilization of Calcium Carbide Residue in Bottom Ash Geopolymer: Study on Mechanical, Mineral Composition and Molecular," *KMUTT Research and Development Journal*, 20 (3), pp. 461-471. (In Thai)
9. Oruji, S., Brake, N.A., Guduru, R.K., Nalluri, L., Günaydin-Şen, Ö., Kharel, K., Rabbanifar, S., Hosseini, S. and Ingram, E., 2019, "Mitigation of ASR Expansion in Concrete Using Ultra-Fine Coal Bottom Ash," *Construction and Building Materials*, 202, pp. 814-824.
10. Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R., 2003, "Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (1), pp. 48-53.

11. Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2018, "An Investigation of Bottom Ash as a Pozzolan Material," *Construction and Building Materials*, 186, pp. 155-162.
12. Oruji, S., Brake, N.A., Nalluri, L. and Guduru, R.K., 2017, "Strength Activity and Microstructure of Blended Ultra-Fine Coal Bottom Ash-Cement Mortar," *Construction and Building Materials*, 153, pp. 317-326.
13. American Society for Testing and Materials, 2017, "ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.02, Philadelphia.
14. Antiohos, S., Papadakis, V., Maganari, K. and Tsimas, S., 2003, "The Development of Blended Supplementary Cementing Materials Consisting of High and Low Calcium Fly Ashes," *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement*, Durban, South Africa, pp. 747-757.
15. Thomas, M., Shehata, M. and Shashiprakash, S., 1999, "The Use of Fly Ash in Concrete: Classification by Composition," *Cement, Concrete and Aggregates*, 21 (2), pp. 105-110.
16. American Society for Testing and Materials, 2016, "ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-In. Or [50-mm] Cube Specimens)," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.01, Philadelphia.
17. Norrarat, P., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2017, "Evaluation of Heat Evolution of Pastes Containing High Volume of Ground River Sand and Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Materials Science*, 23 (1), pp. 57-63.
18. Chindaprasirt, P., Ruangsiriyakul, S., Cao, H. and Bucea, L., 2001, "Influence of Mae Moh Fly Ash Fineness on Characteristics, Strength and Drying Shrinkage Development of Blended Cement Mortars," *The Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Singapore, pp. 5-7.
19. McCarthy, G., Solem, J., Manz, O. and Hassett, D., 1989, "Use of a Database of Chemical, Mineralogical and Physical Properties of North American Fly Ash to Study the Nature of Fly Ash and Its Utilization as a Mineral Admixture in Concrete," *MRS Online Proceedings Library Archive*, 178.
20. Wongsang-ngu, S., Taporn, A., Cheerarat, R. and Lamon, A., 2012, "An Application of Hill Climbing Algorithm for Optimal Ratio of Ground Bottom Ash in Concrete," *KMUTT Research and Development Journal*, 35 (2), pp. 173-185. (In Thai)
21. Kurama, H. and Kaya, M., 2008, "Usage of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture," *Construction and Building Materials*, 22 (9) pp. 1922-1928.
22. Papadakis, V.G., 1999, "Effect of Fly Ash on Portland Cement Systems: Part I. Low-Calcium Fly Ash," *Cement and Concrete Research*, 29 (11), pp. 1727-1736.
23. Cheriaf, M., Rocha, J.C. and Pera, J., 1999, "Pozzolan Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash," *Cement and Concrete Research*, 29 (9), pp. 1387-1391.
24. Hanehara, S., Tomosawa, F., Kobayakawa, M. and Hwang, K., 2001, "Effects of Water/Powder Ratio, Mixing Ratio of Fly Ash, and Curing Temperature on Pozzolan Reaction of Fly Ash in Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, 31 (1), pp. 31-39.
25. Jaturapitakkul, C., Tangpagasit, J., Songmue, S. and Kiattikomol, K., 2011, "Filler Effect of Fine Particle Sand on the Compressive Strength of Mortar," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 18 (2), pp. 240-246.
26. Papadakis, V.G., 2000, "Effect of Fly Ash on

Portland Cement Systems: Part II. High-Calcium Fly Ash," *Cement and Concrete Research*, 30 (10), pp. 1647-1654.

27. Antiohos, S., Maganari, K. and Tsimas, S., 2005, "Evaluation of Blends of High and Low Calcium Fly Ashes for Use as Supplementary Cementing Materials," *Cement and Concrete Composites*, 27 (3), pp. 349-356.

28. Tangpagasit, J., 2007, Pozzolanic Reaction and Packing Effect of Pozzolans on Compressive Strength

of Mortar, *Philosophy of Engineering Dissertation*, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

29. Tangpagasit, J., Songmue, S., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol K., 2005, "A Study of Strength Activity Index of Mortar Due to Hydration Reaction, Packing Effect, and Pozzolanic Reaction of Rice Husk-Bark Ash and Palm Oil Fuel Ash," *KMUTT Research and Development Journal*, 28 (4), pp. 465-476. (In Thai)

